

Grado Universitario en Ingeniería Mecánica
2018-2019

Trabajo Fin de Grado

“Localización de Flujo Plástico en Barras Metálicas Sometidas a Tracción Dinámica: Un Análisis Numérico”

José Antonio Concostrina Beras

Tutor:

José Antonio Rodríguez-Martínez

Leganés, 2019



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

RESUMEN

La presente Memoria corresponde al estudio de la plastificación bajo condiciones dinámicas de una barra metálica sometida a esfuerzos axiales de tracción. El estudio se centra en la localización vía análisis numérico de la estricción, lugar en el que se produce el flujo plástico que produce la rotura dúctil del material.

En el estudio se realizan distintos análisis para determinar qué factores dominan sobre la aparición de la estricción. Para ello se hace uso del análisis adimensional, que permite aislar resultados y observar el efecto de dos grupos adimensionales. Uno de ellos permite observar los efectos inerciales del material, el otro permite observar los efectos de la velocidad de deformación aplicada. En ambos se tiene en cuenta la longitud de la barra.

Se demuestra que la longitud de la barra y la velocidad de la carga dominan sobre la localización de la estricción, incrementar estos valores supone una transición en la localización de la estricción. Además, se muestra el efecto del endurecimiento del material, incrementar dicho efecto por medio de exponentes de endurecimiento produce una variación de los valores para los cuales se produce esta transición e incrementa la ductilidad estructural de la barra.

Por otro lado, se demuestra el efecto que tiene la esbeltez de la barra en el desarrollo y localización de la estricción. Incrementar el radio mientras se mantiene constante la longitud produce una disminución en la velocidad de desarrollo de la estricción.

Palabras clave: Análisis numérico; Análisis dinámico; Flujo plástico; Estudio de tracción.

DEDICATORIA

Deseo expresar mi agradecimiento hacia todos aquellos que me han apoyado durante la realización de este trabajo, en especial a mis padres Rafael y Magda, sin cuyo apoyo me hubiese resultado más difícil, sino imposible, terminar este proyecto. Esta obra está dedicada a ellos.

También deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutor José Antonio por la orientación que me ha concedido.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación del trabajo	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Metodología de trabajo	2
2. ESTADO DEL ARTE	3
2.1. Precedentes	3
2.2. Estado actual de la investigación	4
2.3. Fundamentos	6
3. ENUNCIADO DEL PROBLEMA	8
3.1. Características del estudio	8
3.2. Características constitutivas del material	9
3.3. Condiciones de contorno y geometría	12
3.4. Modelo numérico	14
4. ANÁLISIS	15
4.1. Análisis con k constante	15
4.2. Análisis con k variable	17
4.3. Análisis variando la esbeltez	19
5. RESULTADOS	20
5.1. Resultados con k constante	20
5.2. Resultados con k variable	24
5.3. Resultados con esbeltez variable	25
6. DISCUSIÓN	28
6.1. Líneas futuras de trabajo	31
7. CONCLUSIONES	32
BIBLIOGRAFÍA	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Probetas de ensayo [5].....	12
Figura 3.2 Geometría de la barra.	12
Figura 3.3 Sistema de coordenadas Lagrangiano.	13
Figura 3.4 Efecto Hourglass [2].....	14
Figura 5.1 Distribución de deformación plástica equivalente en el análisis 5.	21
Figura 5.2 Deformación estructural vs Relación de longitudes para m variable y N=0.01.	22
Figura 5.3 Distribución de deformación plástica equivalente en los análisis 13 (a), 14 (b) y 15 (c).	23
Figura 5.4 Deformación estructural vs Relación de longitudes para N variable y m=0.01.	24
Figura 5.5 Distribución de deformación plástica equivalente en función de k.	25
Figura 5.6 Distribución de deformación plástica equivalente en función de Ro.....	26
Figura 5.7 Gráfica Desplazamiento Radial vs Tiempo; Ro=0.015.....	27
Figura 5.8 Gráfica Desplazamiento Radial vs Tiempo; Ro=0.02.....	27
Figura 5.9 Gráfica Desplazamiento Radial vs Tiempo; Ro=0.03.....	27
Figura 6.1 Gráfico de dispersión de resultados.	28

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 EXPONENTES DE ENDURECIMIENTO.....	11
Tabla 3.2 PARÁMETROS DEL MATERIAL.....	11
Tabla 4.1 PARÁMETROS DE CARGA FIJOS.....	15
Tabla 4.2 PARÁMETROS FIJOS A K CONSTANTE.....	16
Tabla 4.3 RELACIONES DE LONGITUDES Y PARÁMETROS VARIABLES.	17
Tabla 4.4 PARÁMETROS FIJOS A K VARIABLE	18
Tabla 4.5 VALORES DE K Y PARÁMETROS VARIABLES	19
Tabla 4.6 CONFIGURACIÓN DE ESTUDIO DE ESBELTEZ.....	19
Tabla 4.7 ESBELTEZ Y RADIO	19
Tabla 5.1 LOCALIZACIÓN PARA $m=0.01$ Y $N=0.01$	20
Tabla 5.2 LOCALIZACIÓN PARA $m=0.05$ Y $N=0.01$	21
Tabla 5.3 LOCALIZACIÓN PARA $m=0.01$ Y $N=0.1$	22
Tabla 5.4 LOCALIZACIÓN PARA $m=0.05$ Y $N=0.1$	23
Tabla 5.5 LOCALIZACIÓN EN FUNCIÓN DE K.....	25
Tabla 5.6 LOCALIZACIÓN DE LA ESTRICCIÓN EN FUNCIO DE R_o	26

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación del trabajo

Conocer el comportamiento mecánico de un material sometido a cargas externas se ha demostrado como un elemento de vital importancia a la hora de llevar a cabo un diseño óptimo en cualquier proyecto dentro de la industria mecánica. Por este mismo motivo se invierte en la realización de ensayos experimentales que permiten caracterizar de manera cada vez más exacta dicho comportamiento.

El ensayo de tracción uniaxial es uno de los ejemplos más comunes. Este ensayo de naturaleza cuasiestática permite determinar características del material tales como el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson o el límite de fluencia entre otras.

En la actualidad se sabe que los resultados obtenidos en este tipo de ensayos, es decir, ensayos realizados bajo condiciones cuasiestáticas, no tienen por qué representar el comportamiento obtenido bajo condiciones dinámicas. De este modo, cobra especial importancia la realización de estudios dinámicos que desvelen el verdadero comportamiento del material. Esto es especialmente cierto en industrias como la naval, ferroviaria o aeronáutica, cuyos productos se ven sometidos a cargas de dinámicas.

Un ejemplo claro de esta disonancia entre los comportamientos bajo condiciones estáticas y bajo condiciones dinámicas es el que se va a tratar a lo largo de este documento: el lugar de localización del flujo plástico. Durante un ensayo tradicional de tracción uniaxial, esto es, bajo condiciones de carga cuasiestáticas, el lugar de flujo plástico se encuentra en el centro de la probeta de ensayo, mientras que, bajo cargas dinámicas, este lugar se puede desplazar a los extremos de la probeta con un comportamiento determinista, como ya se ha demostrado en la literatura [4] y como se pretende mostrar en los siguientes apartados.

Poder determinar el lugar de flujo plástico, y por lo tanto, el lugar de rotura dúctil de un elemento supone un claro avance a la hora de llevar a cabo un diseño estructural. Descubrir cuáles son los elementos que dominan sobre este fenómeno permitiría realizar sistemas de modelado más cercanos a la realidad y que permitan un proceso de diseño más ágil.

El análisis numérico ha demostrado ser una herramienta esencial en este tipo de proyectos, al permitir investigar el desarrollo espaciotemporal de las diferentes variables de campo del elemento de estudio para comprobar las tendencias de comportamiento sin la necesidad de la infraestructura necesaria en un ensayo experimental.

1.2. Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es estudiar el carácter determinista de la localización del flujo plástico en una barra metálica sometida a tracción dinámica. Para ello se va a

emular el estudio que se muestra en el artículo escrito por Alan Needleman [3], del que se extraen las ecuaciones y características del material utilizadas. Al igual que ocurre en este artículo, en la presente memoria se pretende demostrar la relación que tienen la carga aplicada y las características materiales con la localización de la estricción.

Además, se busca hallar la influencia de la geometría de la barra sobre el proceso de estricción y la ductilidad estructural alcanzable.

Cabe destacar que una de las metas en este estudio es obtener resultados que sean congruentes con los obtenidos en la literatura, a la vez que se aplican simplificaciones en la metodología de análisis.

1.3. Metodología de trabajo

A la hora de realizar este tipo de estudios dinámicos es importante contar con la referencia de datos experimentales con los que captar la verdadera naturaleza del comportamiento del material. El uso conjunto de datos experimentales y las herramientas análisis numérico hace posible obtener resultados más completos. Los primeros permiten conocer el comportamiento real a estudiar, mientras que las segundas permiten estudiar las tendencias con un mayor control sobre las variables de campo (tensión, deformación, etc.). Múltiples ejemplos de estudios de esta naturaleza se pueden encontrar en la literatura [7][8][9].

Las obvias limitaciones de este trabajo hacen que sea imposible contar con datos experimentales de primera mano. Para suplir la ausencia de estos datos experimentales propios se ha llevado a cabo una investigación sobre estudios similares presentes en la literatura.

Para obtener los resultados presentados en los siguientes apartados se hace uso de una herramienta de análisis numérico. En este caso, la herramienta utilizada es el software de análisis por elementos finitos *Abaqus/Explicit*, cuya licencia ha sido facilitada por la Universidad Carlos III de Madrid.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Precedentes

El estudio dinámico como medio para obtener el verdadero comportamiento mecánico del material cobró importancia durante la década de los cuarenta. Investigaciones llevadas a cabo durante la época mostraron que un material sometido a cargas dinámicas no tiene por qué comportarse de la manera predicha en ensayos de naturaleza cuasiestática. Esto convierte a los ensayos con cargas a alta velocidades en herramientas esenciales a la hora de caracterizar la verdadera naturaleza del material.

La importancia que cobraron estos estudios supuso importantes avances en ensayos como el tratado en este documento, el ensayo de tracción dinámica, en el que se descubrieron dos características importantes.

En primer lugar, se descubrió la existencia de una relación entre la localización de flujo plástico y la velocidad de impacto, demostrando que los criterios de fallo dúctil observados en ensayos cuasiestáticos no son aplicables bajo condiciones dinámicas.

En segundo lugar, se descubrió la existencia de una velocidad de transición, más tarde conocida como CIV (*Critical Impact Velocity*), a partir de la cual el material alcanza el límite de energía que es capaz de absorber, por lo que se precipita el fallo en la zona de impacto.

Los resultados obtenidos durante estos ensayos impulsaron el desarrollo de investigaciones para definir un campo teórico que los explicase. De esta manera se realizaron destacables avances teóricos sobre la influencia que tiene la velocidad de impacto sobre el comportamiento del material. En uno de estos estudios teóricos quedó demostrado que la velocidad de deformación (al igual que otras variables de campo) varía según la posición y el tiempo dentro del espécimen, viéndose este fenómeno acentuado al aumentar la velocidad de impacto. Esto supuso un problema importante, ya que dificultaba el estudio de la influencia de la velocidad de deformación sobre las propiedades del material. Para solventarlo se aceptó en gran medida la utilización de barras cortas que reducían los efectos inerciales hasta el punto de ser despreciables. Con efectos inerciales casi inexistentes, desaparece el gradiente de velocidad de deformación, pudiendo considerarse esta uniforme y constante dentro del espécimen.

Usar barras cortas permitió el avance en investigaciones de impactos a altas velocidades, permitiendo ver los efectos que estas tenían sobre el material.

Esta metodología de estudio hizo que se desviase la atención sobre la investigación de los efectos inerciales y sus consecuencias en el material. Entre otras, se dejaron de lado las investigaciones sobre la propagación e interacción de ondas, cuyo papel esencial en la relación entre la localización de estricción y velocidad de impacto ya había sido

demostrado. De esta manera, se produce un estancamiento en la caracterización del flujo plástico.

No fue hasta la década de los sesenta cuando cobró importancia la necesidad de tener en cuenta la naturaleza cambiante en el espacio y el tiempo de las variables de campo del espécimen. En este sentido, los métodos de análisis numérico se volvieron herramientas indispensables.

Con el paso del tiempo se han ido desarrollando métodos de análisis cada vez más sofisticados. El uso de simulaciones por elementos finitos ha dado lugar a avances importantes en la caracterización de fenómenos dinámicos.

En la actualidad se sigue investigando sobre los efectos de las cargas dinámicas en el desarrollo del flujo plástico, con el objetivo de descubrir los factores que dominan sobre dicho fenómeno.

2.2. Estado actual de la investigación

Como ya se ha mencionado anteriormente, durante la realización de un ensayo de tracción tradicional, es decir, bajo condiciones de carga cuasiestáticas, al alcanzarse una elongación determinada se produce un flujo plástico localizado que desemboca en el fallo dúctil del material. En condiciones de simetría y equilibrio, y en ausencia de imperfecciones geométricas o materiales de la muestra, la localización de dicho fallo se encuentra en el centro de la probeta o barra ensayada.

En el caso de existir una imperfección geométrica o material, se suele aplicar la teoría del eslabón más débil. En estos casos, la localización del fallo coincide con la posición de la imperfección, que actúa como concentrador de tensiones.

Al aplicarse condiciones de carga dinámica este comportamiento no tiene por qué cumplirse. Esto es especialmente llamativo en el caso de existir una imperfección. Al existir una imperfección, lo más común es pensar que el fallo se producirá en la localización de esta, pero ha quedado demostrado experimentalmente [6][7] que en muchos casos la estricción ignora la imperfección y aparece en otra localización. Se ha demostrado que este comportamiento se debe a los efectos inerciales que se ven acentuados con las cargas dinámicas. Estos efectos producen gradientes de deformación plástica a lo largo de la barra. Al alcanzar un valor crítico se produce la estricción, ignorando de esta manera la localización de la imperfección.

Entender qué factores predominan en este fenómeno se ha convertido en el principal objeto de estudio de muchos autores.

La investigación llevada a cabo por Osovski y compañía [4] sobre barras sin defectos sometidas a tracción dinámica muestran la influencia que tiene la geometría y las

condiciones de contorno sobre la ductilidad y la localización de la estricción, presentando resultados experimentales y numéricos interesantes. En los resultados experimentales se puede observar que, tal y como comentan en el documento, manteniendo la velocidad de impacto constante, un aumento de la velocidad de deformación o una disminución de la longitud de la barra supone un aumento en la ductilidad estructural (macroscópica). También se puede observar diferentes localizaciones de estricción en función de las características de la carga y de la geometría de la barra.

Los análisis numéricos muestran resultados que apoyan a los obtenidos experimentalmente, lo que demuestra el carácter determinista de la localización de la estricción. Además, al realizarse las simulaciones numéricas se ha mostrado la importancia que tiene las condiciones de contorno y la modelización de la barra sobre los resultados finales. Un ejemplo claro de esto se comenta al comparar los resultados de dos modelos geométricos de barra (*FE model A* y *FE model B*). En el segundo modelo, que añade más longitud al incluir los agarres de la barra, se muestran resultados incongruentes con los obtenidos experimentalmente. Este resultado confirma la influencia que tiene la propagación de ondas sobre la localización de la estricción. Un aumento de la distancia entre las superficies sobre las que se aplican las cargas supone una alteración en el proceso de interacción de ondas, y por lo tanto, altera la localización de la estricción.

Otras investigaciones recientes muestran la naturaleza determinista de la localización de la estricción. Los casos estudiados por D. Rittel y A. Vaz-Romero [6][10] muestran dicho comportamiento en barras con imperfecciones. Estos documentos demuestran que el fallo no tiene por qué localizarse en el lugar de la imperfección. Son los efectos inerciales y no la teoría del eslabón más débil los que dominan sobre la localización de la estricción. Son las condiciones de contorno en conjunto con las propiedades del material las que definen el comportamiento del flujo plástico.

Rotbaum profundiza sobre estos resultados en estudios posteriores [7]. En ellos vuelve a mostrar el papel que juega las condiciones de contorno, en concreto, la velocidad de la carga. También profundiza sobre los efectos que tiene el endurecimiento del material con respecto a la localización del flujo plástico. Incrementar el coeficiente de endurecimiento por deformación del material en los alrededores de la entalla (imperfección geométrica) hace que a altas velocidades los alrededores de esta se endurezcan, reduciendo la deformación local y transfiriendo la carga a otras posiciones de la barra.

Vaz-Romero también muestra en otro estudio [9] la influencia de las condiciones de contorno y la geometría. A partir de un análisis numérico se observa como al inicializarse las variables de campo se produce un retardo en la aparición de la estricción. Como señalan los autores, los efectos de interacción de ondas se ven reducidos al llevar a cabo una inicialización de las variables de campo. Otra observación interesante es la que se obtiene al simular modelos con baja esbeltez. Como ocurre con los resultados experimentales, en modelos con un índice de longitud-radio bajo aparecen signos de

múltiples lugares de estricción, lo que muestra la competición dentro del espécimen. Las deformaciones en este tipo de caso se mantienen uniformes a lo largo de la muestra, lo que dificulta la aparición de un lugar preferente para la estricción. Este comportamiento es el mismo que muestran las barras cortas utilizadas durante mucho tiempo para la realización de ensayos dinámicos por su alta estabilidad.

Mientras que los estudios mencionados anteriormente se centran en comprobar los efectos que tienen la geometría y las condiciones de contorno sobre la aparición la estricción, existen otros que han optado por ver qué factores afectan al proceso de desarrollo de esta.

En uno de estos documentos [8] Vaz-Romero y Rodríguez-Martínez investigan el efecto que tiene el diámetro sobre la velocidad de desarrollo de la estricción. Para ello se lleva a cabo una comparación entre los resultados obtenidos a partir de ensayos experimentales y simulaciones numéricas. En concreto, se realizan dos tipos de análisis numéricos: elementos finitos y diferencias finitas. Los resultados obtenidos experimentalmente y por medio de la simulación por elementos finitos muestran una disminución en la velocidad de formación de la estricción al aumentar el diámetro, lo que supone un aumento del tiempo hasta el fallo final, y por lo tanto, un aumento de la elongación hasta el fallo. Por otro lado, el análisis por diferencias finitas no refleja un comportamiento semejante. Esta discrepancia entre los resultados muestra la importancia de la multiaxialidad de tensiones, tal y como comentan los autores. El análisis por diferencias finitas, cuya naturaleza es unidimensional, no puede reproducir dicho comportamiento.

2.3. Fundamentos

Una serie de ideas fundamentales se han extraído y recopilado a partir de diversos estudios presentes en la literatura, entre los que se encuentran los mencionados a lo largo de este trabajo. Estos fundamentos son esenciales para saber interpretar correctamente los resultados obtenidos en el presente documento. A continuación se listan los más relevantes.

- El fenómeno de propagación e interacción de ondas produce un gradiente de deformaciones a lo largo de la barra. Una acumulación de estas deformaciones puede producir la estricción. Con cargas dinámicas este fenómeno cobra especial importancia, convirtiéndose en el mecanismo principal que determina la localización del flujo plástico frente a otros posibles mecanismos (ej.: teoría del eslabón más débil).
- La localización del flujo plástico tiene una naturaleza determinista, y por lo tanto, es posible predecirla en cierta medida.
- Los principales factores que dominan sobre la localización de la estricción son las condiciones de contorno y la geometría del material.

- Existe una velocidad a partir de la cual se precipita la aparición de la estricción en el lado donde se aplica la carga dinámica. Esta velocidad está denominada como CIV.
- La ductilidad estructural (basada en la elongación del espécimen) es directamente proporcional a la velocidad de la carga dinámica, e inversamente proporcional a la longitud.
- Barras con una esbeltez baja son menos susceptibles a una localización del flujo plástico, es decir, las deformaciones son más uniformes. Por este motivo las barras cortas tienden a un comportamiento cuasiestático.
- Incrementar el diámetro de la barra produce una reducción de la velocidad de desarrollo de la estricción. Esto se traduce en una mayor elongación hasta el fallo.

3. ENUNCIADO DEL PROBLEMA

3.1. Características del estudio

El estudio se centra en caracterizar el comportamiento del flujo plástico en una barra metálica sometida a tracción dinámica. Para ello se va a seguir el mismo procedimiento que el descrito por Alan Needleman en su artículo [3]. La principal diferencia es que en este trabajo la barra a analizar esta libre de cualquier tipo de imperfección geométrica (entalla).

Se busca analizar el papel que juegan las condiciones de contorno y los efectos inerciales sobre la localización de la estricción. Para ello se hace uso del análisis adimensional mediante el uso de dos grupos adimensionales. El primer grupo, mostrado en la Ecuación 1, hace referencia a los efectos inerciales del material. El segundo grupo, mostrado en la Ecuación 2, representa el efecto que tiene la carga, caracterizada como una velocidad de desplazamiento en el extremo (condición de contorno).

$$\frac{L_0}{L_c} = \frac{V_1}{c_0} \quad (1)$$

$$k = \frac{V_1/L_0}{\dot{\epsilon}_0} \quad (2)$$

Donde:

- L_0 es la longitud de la barra.
- L_c es la longitud característica.
- V_1 es la velocidad de la carga.
- c_0 es la velocidad de la onda en el medio material.
- $\dot{\epsilon}_0$ es la velocidad de deformación de referencia.
- k es la relación que hay entre la velocidad de deformación de referencia y la aplicada.

Con intención de ver qué efectos tienen individualmente cada uno de estos grupos se realizan diversos análisis. En cada uno de ellos se cambia el valor de uno de estos grupos mientras que el otro se mantiene constante. Con esto se consigue aislar resultados, permitiendo saber qué efectos corresponden a cada grupo.

Por otro lado, se estudia la influencia del endurecimiento del material. Para ello se hace uso de diferentes valores del exponente de endurecimiento por deformación y del exponente de endurecimiento por velocidad de deformación.

Las características constitutivas, al igual que las ecuaciones, han sido tomadas directamente del artículo.

Además de lo comentado anteriormente, a diferencia del artículo original, en este documento se estudia la influencia del radio de la barra sobre los resultados finales. Para ello se varía la esbeltez de la barra (Ecuación 3) y se observa cómo cambia la elongación hasta alcanzar el fallo.

$$esbeltez = \frac{L_0}{R_0} \quad (3)$$

Donde:

- R_0 es el radio de la barra.
- L_0 es la longitud de la barra.

Cabe destacar que *Abaqus/Explicit*, programa utilizado para la obtención de resultados, no simula la rotura del material, por lo que las simulaciones realizadas finalizan cuando el desplazamiento radial alcanzado deja claro la formación de la estricción en una localización concreta. El valor con el que esto ocurre en cada caso queda a discreción del autor de este documento.

3.2. Características constitutivas del material

El material utilizado para las simulaciones tiene un comportamiento elasto-viscoplástico con endurecimiento isotrópico. La plastificación sigue una ley exponencial de endurecimiento como se muestra en la Ecuación 4. Se trata de un material sensible a la deformación y a la velocidad de deformación.

$$\sigma_e = \sigma_0 \cdot \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0 \cdot t_c} \right)^m \cdot g(\epsilon_p) \quad (4)$$

$$g(\epsilon_p) = \left(1 + \frac{\epsilon_p}{\epsilon_0} \right)^N \quad (5)$$

Donde:

- σ_0 es el límite elástico.
- σ_e es la tensión de fluencia (nuevo límite elástico).
- $\dot{\epsilon}_p$ es la velocidad de deformación plástica.
- $\dot{\epsilon}_0$ es la velocidad de deformación de referencia.
- t_c es el tiempo característico.

- g es la función de fuerza de fluencia.
- ε_p es la deformación plástica.
- ε_0 es la deformación en el límite elástico.
- m es el exponente de endurecimiento por velocidad de deformación.
- N es el exponente de endurecimiento por deformación.

Por lo general, para conseguir un comportamiento lo más cercano a la realidad, las ecuaciones constitutivas que definen al material se introducen mediante el uso de subrutinas.

En este caso se han usado comandos propios de *Abaqus/Explicit*, lo que supone una importante simplificación del estudio. Para ello se expresa la ley de endurecimiento como la multiplicación de dos factores (Ecuación 6). En primer lugar, se introduce el factor A (Ecuación 7) por medio de una tabla de valores realizada con una hoja de cálculo. En segundo lugar, se introduce el B (Ecuación 8) como una ley exponencial mediante la interfaz del programa.

$$\sigma_e = A \cdot B \quad (6)$$

$$A = \sigma_0 \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0}\right)^N \quad (7)$$

$$B = \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0 \cdot t_c}\right)^m \quad (8)$$

El factor A corresponde al endurecimiento por deformación plástica. Como puede verse en la Ecuación 7, el comportamiento queda caracterizado por el exponente de endurecimiento por deformación. El factor B corresponde al endurecimiento por velocidad de deformación y queda caracterizado por el exponente de endurecimiento por velocidad de deformación.

Durante el estudio se han llevado a cabo diversos análisis con distintos valores de los ya mencionados exponentes de endurecimiento. Los distintos valores utilizados quedan recogidos en la tabla 3.1.

Como se puede ver en los valores recogidos en esta tabla, el exponente N_1 corresponde a un comportamiento material cercano al idealmente plástico, por lo que los efectos de endurecimiento por deformación quedan reducidos significativamente, mientras que el exponente N_2 corresponde a un comportamiento en el que sí se tiene en cuenta el endurecimiento por deformación.

Tabla 3.1 EXPONENTES DE ENDURECIMIENTO

Exponente	Símbolo	Valor
Endurecimiento por velocidad de deformación	m_1	0.01
	m_2	0.05
Endurecimiento por deformación	N_1	0.01
	N_2	0.1

Los parámetros del material quedan recogidos en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 PARÁMETROS DEL MATERIAL

Símbolo	Parámetro y unidad	Valor
σ_0	Límite elástico (MPa)	800
ϵ_0	Deformación en límite elástico (-)	0.004
$\dot{\epsilon}_0$	Velocidad de deformación de referencia (s^{-1})	1000
E	Módulo de Young (GPa)	200
ν	Coefficiente de Poisson (-)	0.3
c_0	Velocidad de onda (m/s)	5000
ρ	Densidad (kg/m^3)	8000

La densidad utilizada se obtiene a partir de la velocidad de la onda y el módulo de Young (Ecuación 9).

$$\rho = \frac{E}{c_0^2} \quad (9)$$

3.3. Condiciones de contorno y geometría

En los ensayos de tracción se utilizan probetas que suelen ser planas o cilíndricas. Estas probetas cuentan con zonas de mayor sección en los extremos que permiten una sujeción óptima durante la realización del ensayo (Fig. 3.1). En el caso aquí estudiado no se busca reproducir un ensayo, sino que se busca explorar las tendencias presentes en el fenómeno de la estricción, por lo que la geometría se simplifica a la de una barra de sección constante con longitud L_0 y radio R_0 (Fig. 3.2).

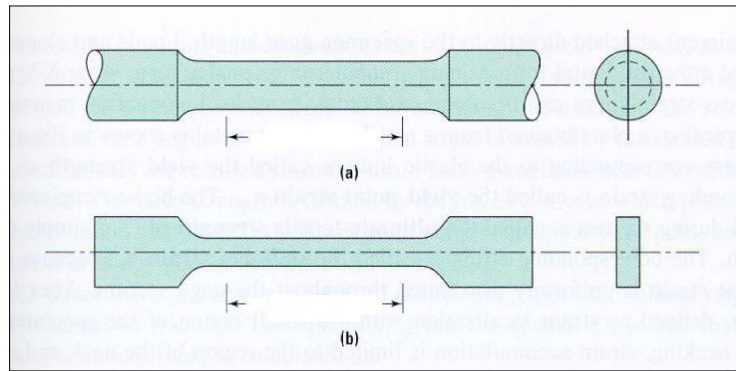


Figura 3.1 Probetas de ensayo [5].

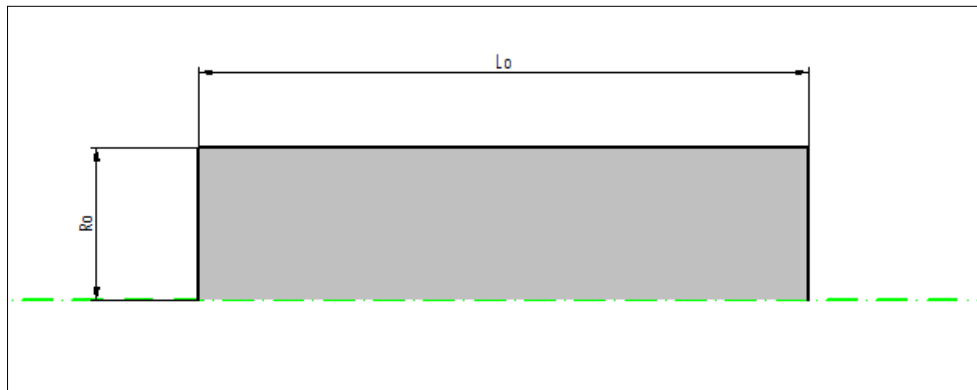


Figura 3.2 Geometría de la barra.

Por comodidad, y teniendo en cuenta la simetría axial de la barra, se decide trabajar con variables con un sistema de referencia plano (Fig. 3.3)

Las cargas aplicadas en el extremo de la barra se caracterizan como desplazamientos a velocidad constante. Sobre el otro extremo se aplican las restricciones de desplazamiento axial nulo y giro nulo, simulando de esta manera un agarre ideal (velocidad nula). Se permite el desplazamiento radial, para evitar la aparición preferente de la estricción.

Las condiciones iniciales de la barra son velocidad, aceleración y desplazamiento nulo. Todas las variables de campo se inicializan en cero.

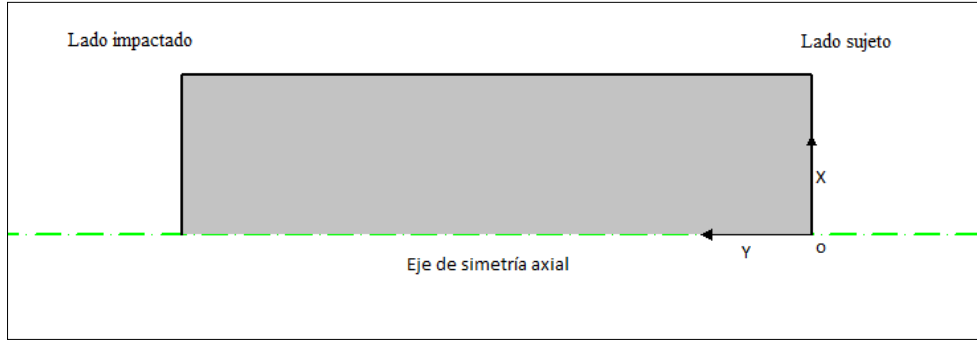


Figura 3.3 Sistema de coordenadas Lagrangiano.

La carga se aplica en dos fases (Ecuación 10). Una primera fase de duración T_r en la que se produce una aceleración constante hasta alcanzar la velocidad correspondiente, y una segunda fase de duración indeterminada (hasta el fallo) en la que se mantiene en dicha velocidad.

$$V(T) = \begin{cases} T \cdot a & \text{para } T < T_r \\ V_1 & \text{para } T > T_r \end{cases} \quad (10)$$

Donde:

- a es la aceleración.
- V_1 es la velocidad de la carga.
- T_r es el tiempo de carga.
- T es la coordenada en el tiempo.

La aceleración se obtiene a partir de la velocidad y el tiempo de carga, tal y como se indica en la Ecuación 11.

$$a = \frac{V_1}{T_r} \quad (11)$$

El tiempo de carga T_r se define a partir del tiempo de carga adimensional (Ecuación 12) cuyo valor se toma como $t_r = 1.265 \times 10^{-3}$ para los cálculos.

$$T_r = t_r \cdot t_c \quad (12)$$

3.4. Modelo numérico

El espécimen estudiado es una barra de sección circular, es decir, es un cuerpo de revolución. Por este motivo, el modelo se define a partir de una superficie rectangular con simetría en el eje axial (Fig. 3.3). Esto permite trabajar con elementos planos, lo que reduce el consumo de recursos computacionales.

El elemento utilizado para el análisis es el CAX4R (siguiendo la nomenclatura de *Abaqus*), que corresponde a un elemento axilsimétrico cuadrilátero de 4 nodos e interpolación bilinear. Este elemento cuenta con integración reducida para evitar la rigidización del modelo, y con control de *hourglass*, para evitar la aparición de deformaciones inexistentes (Fig. 3.4).

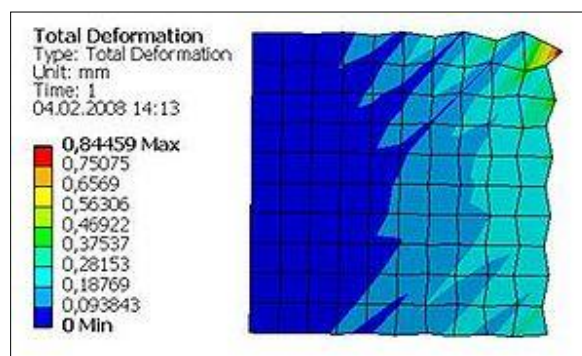


Figura 3.4 Efecto *Hourglass* [2].

La relación de aspecto del elemento se define como la relación entre los lados de este. En los análisis realizados se utilizan elementos con una relación de aspecto 1:1 (forma cuadrada). Tal y como menciona Vaz-Romero [8], esta relación es la ideal para el análisis de fenómenos dinámicos como el aquí estudiado.

Durante la mayoría de los análisis el número de elementos utilizados se ha mantenido en 40000 (100 x 400) al ser suficientes para captar el comportamiento deseado. En algunos casos especiales (ej.: aparición de dos lugares de estricción), este número se ha aumentado con el fin de obtener resultados más precisos.

Cabe destacar que para casos de esbeltez igual a 4 (Ecuación 3), esta proporción de elementos genera una relación de aspecto inicial 1:1, en congruencia con lo mencionado anteriormente.

La distribución de elementos en el modelo se mantiene homogénea en todo el modelo al no existir ninguna zona con sensibilidad especial.

4. ANÁLISIS

Para poder realizar los análisis correspondientes es necesario terminar de definir los parámetros presentes en los mismos. Parámetros como la longitud (L_0), el radio (R_0) o el tiempo de carga (T_r) dependen de los valores dados a los dos grupos adimensionales presentados en el apartado 3.1 (Ecuaciones 1 y 2).

Los parámetros del material mostrados en la Tabla 2.2, así como otros parámetros relacionados con la carga (Tabla 4.1) se mantienen constantes para todos los análisis.

Tabla 4.1 PARÁMETROS DE CARGA FIJOS

Símbolo	Parámetro y unidad	Valor
t_r	Tiempo de carga adimensional (—)	1.265×10^{-3}
$\dot{\epsilon}_0$	Velocidad de deformación de referencia (s^{-1})	1000

4.1. Análisis con k constante

En primer lugar, se llevan a cabo los análisis alterando la relación de longitudes y manteniendo constante el factor k . El valor de k se toma como la unidad para estos casos.

Incrementar la relación de longitudes manteniendo las características del material constantes supone un aumento proporcional de la energía de la onda (mayores efectos inerciales) [3].

Como se puede ver en estas expresiones, alterar la relación de longitudes manteniendo las características del material constantes supone una alteración en la velocidad aplicada (V_1). Al mantenerse el factor k constante y variar la velocidad, la longitud de la barra (L_0) se ve obligada a cambiar, así como el radio (R_0), que varía en función de la esbeltez seleccionada (Ecuación 3). Ninguno de los tiempos (T_r o t_c) se ve alterado, pero tal y como muestra la Ecuación 11, un cambio de la velocidad supone una variación de la aceleración.

De esta manera, los parámetros que cambian al variar la relación de longitudes son:

- La longitud de la barra (L_0).
- El radio de la barra (R_0).
- La velocidad aplicada (V_1).
- La aceleración aplicada (a).

Hay que destacar que la longitud y la velocidad aumentan proporcionalmente, o lo que es lo mismo, la velocidad de deformación aplicada se mantiene constante (Ecuación 13). De igual modo, el radio y la aceleración también son directamente proporcionales a la longitud.

$$V_1/L_0 = \dot{\varepsilon}_0 \cdot k \quad (13)$$

Donde:

- V_1/L_0 es la velocidad de deformación aplicada.

La longitud característica (L_c) y el tiempo característico (t_c) son función de la velocidad de deformación aplicada (Ecuaciones 14 y 15), por lo que estos valores se mantienen constantes durante estos análisis.

$$t_c = \frac{L_c}{V_1} \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_0}} \quad (13)$$

$$L_c = \frac{c_0}{V_1/L_0} \quad (14)$$

Los parámetros que se mantienen constantes durante los análisis en los que la relación de longitudes varía se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 PARÁMETROS FIJOS A K CONSTANTE

Símbolo	Parámetro y unidad	Valor
t_c	Tiempo característico (s)	0.0158
L_c	Longitud característica (m)	5
T_r	Tiempo de carga (s)	20×10^{-6}
—	Esbeltez (—)	4
k	Relación de velocidades de deformación (—)	1

Los valores de relaciones de longitudes utilizados, así como los parámetros que dependen de estos se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 RELACIONES DE LONGITUDES Y PARÁMETROS VARIABLES.

L_0/L_c	$L_0 (m)$	$R_0(m)$	$V_1 (m/s)$	$a (\times 10^6 m/s^2)$
0.004	0.02	0.005	20	1
0.006	0.03	0.0075	30	1.5
0.008	0.04	0.01	40	2
0.012	0.06	0.015	60	3
0.016	0.08	0.02	80	4

En total se realizan 20 análisis diferentes. Con cada relación de longitudes se aplican las distintas combinaciones de exponentes de endurecimiento (Tabla 3.1).

4.2. Análisis con k variable

En este caso se mantiene la relación de longitudes constante y se cambia la relación de velocidades de deformación. Al variar k se obtiene una medida de cómo afecta la velocidad de carga sobre el desarrollo de la estricción, independientemente de la inercia del material (la relación de longitudes se mantiene constante).

Variar k , tal y como se puede ver en la Ecuación 2, supone alterar la velocidad de deformación aplicada mientras que la velocidad de referencia se mantiene constante (Tabla 4.1). A su vez, esta alteración de la velocidad de deformación supone un cambio en la longitud característica (L_c) (Ecuación 14).

Al mantenerse la relación de longitudes constante, una variación de L_c supone una variación de la longitud de la barra (L_0), y a su vez, una variación del radio (R_0).

El tiempo característico (t_c) también cambia al ser inversamente proporcional a la velocidad de deformación aplicada (Ecuación 13). Al mantenerse el tiempo de carga adimensional (t_r), el tiempo de carga (T_r) varía con el característico (Ecuación 12). Lo mismo ocurre con la aceleración (a).

Por lo tanto, los parámetros del análisis que cambian con k son:

- La longitud de la barra (L_0).
- El radio de la barra (R_0).
- La longitud característica (L_c).
- El tiempo característico (t_c).
- El tiempo de carga (T_r)
- La aceleración aplicada (a).

Las longitudes, así como el radio y los tiempos son inversamente proporcionales a k .

La relación de longitudes utilizada para los cálculos es $L_0/L_c=0.012$, ya que el resultado obtenido por esta configuración destaca sobre los demás. Los exponentes de endurecimiento con los cuales se obtiene dicho resultado, así como otros parámetros que se mantienen constante durante los análisis se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 PARÁMETROS FIJOS A K VARIABLE

Símbolo	Parámetro y unidad	Valor
L_0/L_c	Relación de longitudes (-)	0.012
V_1	Velocidad de la carga (m/s)	60
N	Exponente de endurecimiento por deformación (-)	0.1
m	Exponente de endurecimiento por velocidad de deformación (-)	0.01
—	Esbeltez (-)	4

En la Tabla 4.5 se muestran los distintos valores de k utilizados, así como el de los parámetros que varían en función de estos.

Tabla 4.5 VALORES DE K Y PARÁMETROS VARIABLES

$k (-)$	$L_0 (m)$	$R_0 (m)$	$L_c (m)$	$t_c (s)$	$T_r (\times 10^{-4} s)$	$a (\times 10^6 m/s^2)$
0.1	0.6	0.15	50	0.1581	2	0.3
1	0.06	0.015	5	0.01581	0.2	3
10	0.006	0.0015	0.5	0.001581	0.02	30

4.3. Análisis variando la esbeltez

En este caso se va a variar la esbeltez manteniendo constante las relaciones de longitudes y de velocidades de deformación. Esto supone una variación del radio (Ecuación 3), manteniendo los demás parámetros constantes.

Al igual que ocurre en el apartado 4.2, la configuración a estudiar para ver los efectos de la esbeltez es la correspondiente a los valores que se muestran en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 CONFIGURACIÓN DE ESTUDIO DE ESBELTEZ

L_0/L_c	k	m	N
0.012	1	0.01	0.1

Los parámetros del análisis son los mismos que los utilizados en apartados anteriores para esta configuración. El único valor que cambia es el del radio. Los radios utilizados para cada valor de esbeltez se muestran en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7 ESBELTEZ Y RADIO

<i>esbeltez</i>	4	3	2
$R_0 (m)$	0.015	0.02	0.03

5. RESULTADOS

5.1. Resultados con k constante

Se han realizado un total de veinte análisis utilizando los parámetros presentados en los apartados anteriores. La localización de la estricción para cada uno de ellos se muestra en las tablas 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4. Esta localización se expresa según la componente Y del sistema de referencia Lagrangiano (Fig. 3.3). La localización relativa se obtiene dividiendo entre la longitud de la barra y su valor está comprendido en el intervalo $[0,1]$.

Tabla 5.1 LOCALIZACIÓN PARA $m=0.01$ Y $N=0.01$

Análisis N.º	L_0/L_c	Localización de la estricción (m)	Localización relativa
1	0.004	0.02	1
2	0.006	0.03	1
3	0.008	0.04	1
4	0.012	0.06	1
5	0.016	0.08	1

Como puede verse en la Tabla 5.1, la estricción aparece en el lado impactado en todas las barras (Análisis del 1 al 5). No existe un desplazamiento del lugar de estricción para ninguno de los valores de relación de longitudes estudiados. Cabe destacar la presencia de una segunda zona de estricción que no llega a desarrollarse en $Y = 0$ durante el análisis 4 (Fig. 5.1 a). Lo mismo ocurre en el análisis 5, pero en este caso la segunda localización es más difusa (Fig. 5.1 b).

En la Tablas 5.2 se muestra cómo el comportamiento anterior se sigue repitiendo a pesar de haber variado el valor del exponente de endurecimiento por velocidad de deformación. Todas las barras tienen la estricción localizada en el lado impactado ($Y = L_0$). En las barras que corresponden a los análisis 9 y 10 vuelven a aparecer signos de un posible segundo lugar de estricción.

En la Figura 5.2 puede verse una gráfica en la que enfrentan el desplazamiento longitudinal normalizado (U_y/L_0) contra la relación de longitudes. Este desplazamiento, conocido como deformación estructural en la literatura [4] ha sido medido en el momento en el que se ha definido por completo la localización de la estricción.

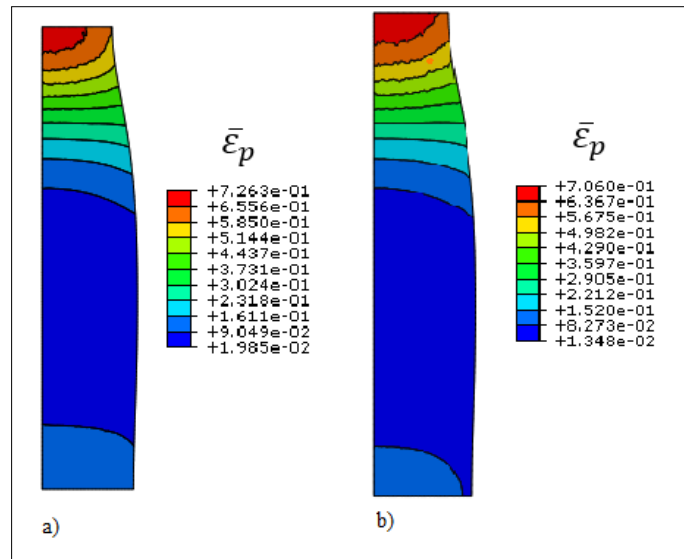


Figura 5.1 Distribución de deformación plástica equivalente en el análisis 5.

Tabla 5.2 LOCALIZACIÓN PARA $m=0.05$ Y $N=0.01$

Análisis N.º	L_0/L_c	Localización de la estricción (m)	Localización relativa
6	0.004	0.02	1
7	0.006	0.03	1
8	0.008	0.04	1
9	0.012	0.06	1
10	0.016	0.08	1

En dicha gráfica se observa una disminución de la deformación estructural hasta alcanzar la estricción al aumentar el exponente de endurecimiento por deformación (m). Lo normal sería que ocurriese lo contrario, al incrementar el endurecimiento la barra soportaría mejor las deformaciones plásticas, retrasándose la aparición de la estricción. El por qué puede estar ocurriendo esto se discutirá en los apartados siguientes.

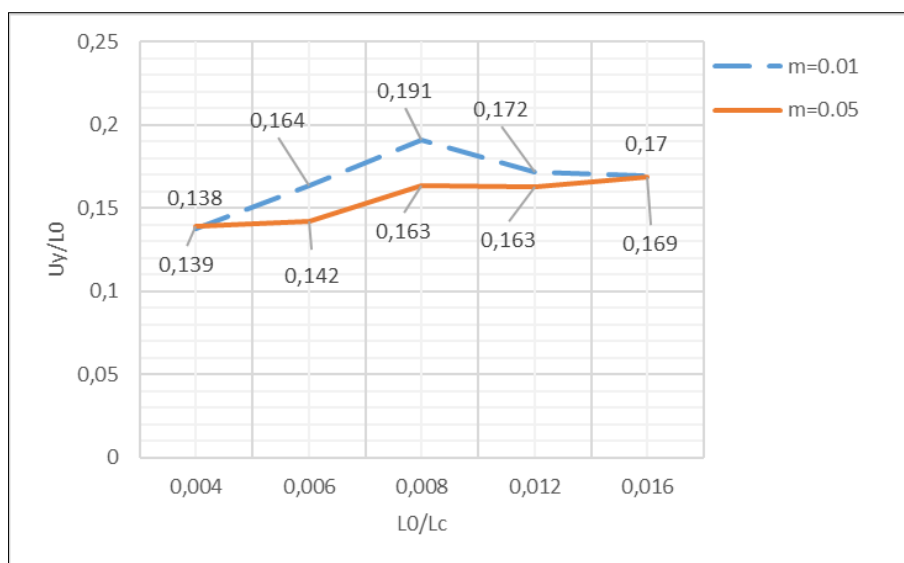


Figura 5.2 Deformación estructural vs Relación de longitudes para m variable y $N=0.01$.

Al cambiar los valores de los exponentes de endurecimiento por deformación (N) se empiezan a obtener resultados con un cambio de localización de la estricción. Como se muestra en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 LOCALIZACIÓN PARA $m=0.01$ Y $N=0.1$

Análisis N.º	L_0/L_c	Localización de la estricción (m)	Localización relativa
11	0.004	0.02	1
12	0.006	0	0
13	0.008	0	0
14	0.012	0.046	0.77
15	0.016	0.08	1

Existe una transición del lugar de la estricción entre los análisis número 11 y 12, y entre los análisis número 13 y 15. El análisis número 14 muestra dicha transición (Fig. 5.3).

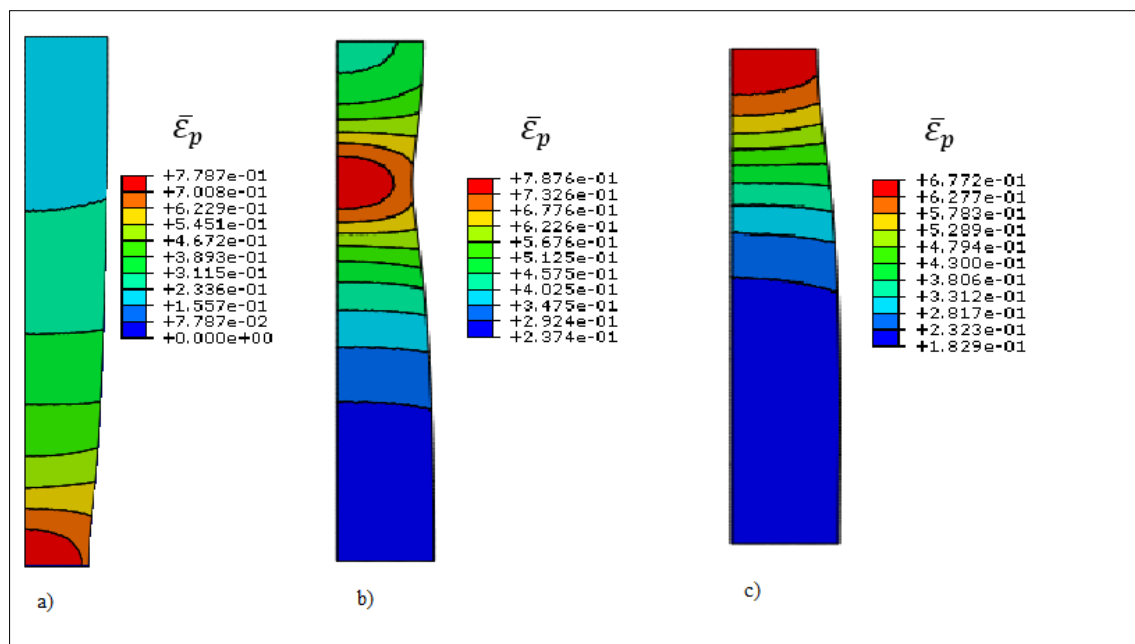


Figura 5.3 Distribución de deformación plástica equivalente en los análisis 13 (a), 14 (b) y 15 (c).

Tabla 5.4 LOCALIZACIÓN PARA $m=0.05$ Y $N=0.1$

Análisis N.º	L_0/L_c	Localización de la estricción (m)	Localización relativa
16	0.004	0.02	1
17	0.006	0	0
18	0.008	0	0
19	0.012	0.046	0.77
20	0.016	0.08	1

La Tabla 5.4, que corresponde a los análisis realizados con $m = 0.05$ y $N = 0.1$, muestra unos resultados idénticos a los obtenidos en los análisis con $m = 0.05$ y $N = 0.1$ (Tabla 5.3). Al igual que lo que ocurre con los análisis correspondientes a la Tabla 5.1 y a la Tabla 5.2, cambiar el valor del exponente de endurecimiento por velocidad de deformación no produce ningún cambio significativo en la localización de la estricción. Para estos casos también se aprecia una reducción de la deformación estructural con el aumento del exponente de endurecimiento.

Si bien un aumento del exponente m no muestra ningún efecto significativo sobre la localización de la estricción, un incremento del exponente N (endurecimiento por deformación plástica) muestra un efecto diametralmente diferente. Incrementar el valor de N supone un cambio importante en el comportamiento del material, pasando este a mostrar varias transiciones de la localización de la estricción.

Como muestra la gráfica de la Figura 5.4, al incrementar el valor de N se produce un incremento significativo de la deformación estructural necesaria hasta la formación de la estricción.

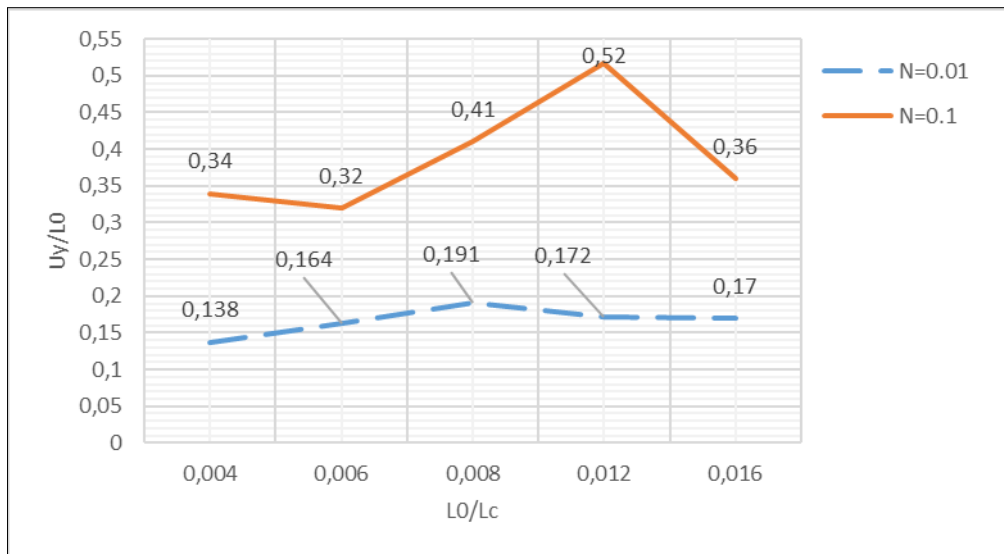


Figura 5.4 Deformación estructural vs Relación de longitudes para N variable y $m=0.01$.

5.2. Resultados con k variable

Tomando como punto de partido los resultados obtenidos anteriormente, se realizan una serie de análisis para determinar el efecto que tiene k sobre la localización de la estricción. Para ello se toma como referencia el análisis número 14 (Tabla 5.3). En este análisis el lugar de la estricción se encuentra en un punto intermedio al de la mayoría de los demás análisis (posición relativa 0.77). Se ha elegido este análisis como referencia ya que muestra un estado de transición entre los dos estados predominantes (fallo en la posición relativa 1 y fallo en 0).

En la Tabla 5.5 se presenta la localización del fallo para cada caso. Se han realizado dos análisis, en uno se reduce significativamente el valor de k , mientras que en el otro se aumenta.

Nótese que el resultado de referencia (análisis 14) tiene un valor de $k = 1$.

Tabla 5.5 LOCALIZACIÓN EN FUNCIÓN DE K

Análisis N.º	k	Localización de la estricción (m)	Localización relativa
14.A	0.1	0.6	1
14 (Referencia)	1	0.046	0.77
14.B	10	0.006	1

En la Figura 5.5 se muestra la distribución de deformación plástica equivalente que corresponde a cada caso.

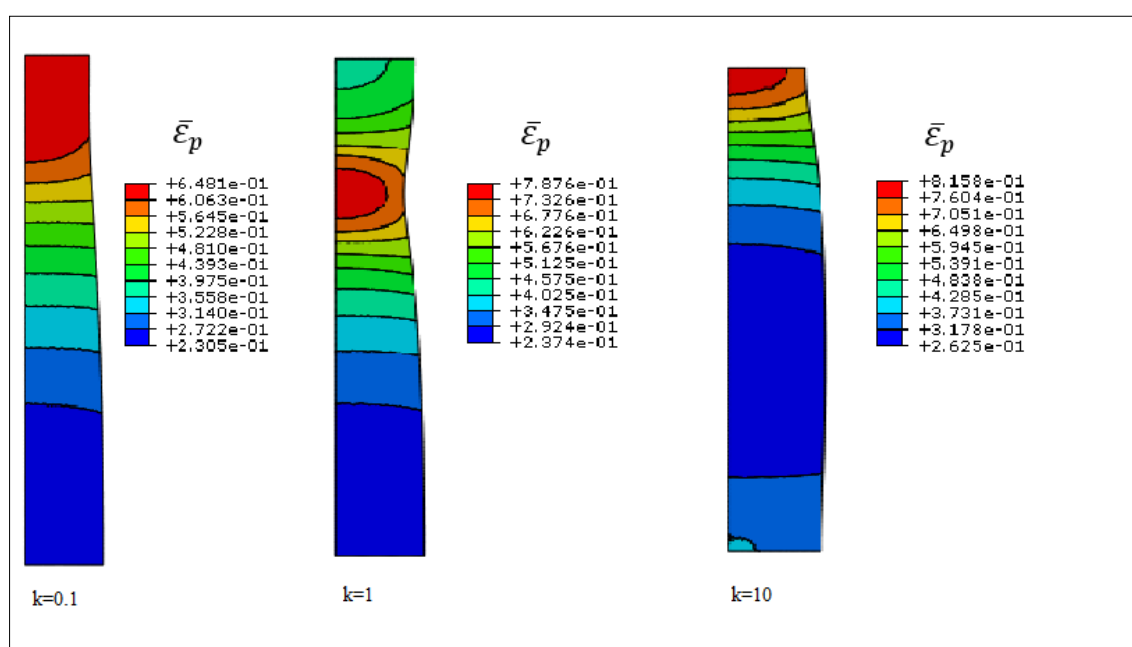


Figura 5.5 Distribución de deformación plástica equivalente en función de k .

La deformación estructural en el momento del desarrollo de la estricción se mantiene relativamente constante, oscilando sobre el valor $U_y/L_0=0.48$.

5.3. Resultados con esbeltez variable

Al igual que en el apartado anterior, se toma como referencia el análisis número 14 (Tabla 5.3). En este caso, se observa que efecto tiene variar la esbeltez sobre el desarrollo de la estricción.

En la Tabla 5.6 se muestra la localización de la estricción en función del radio de la barra.

Tabla 5.6 LOCALIZACIÓN DE LA ESTRICCIÓN EN FUNCIO DE R_0

Análisis N.º	R_0	Localización de la estricción (m)	Localización relativa
14 (Referencia)	0.015	0.046	0.77
14.C	0.02	0.6	1
14.D	0.03	0.006	1

Al igual que ocurre cuando se varía k , variar el radio supone una transición del lugar de la estricción.

En la Figura 5.6 se muestra la distribución de deformación plástica equivalente en el momento de la estricción.

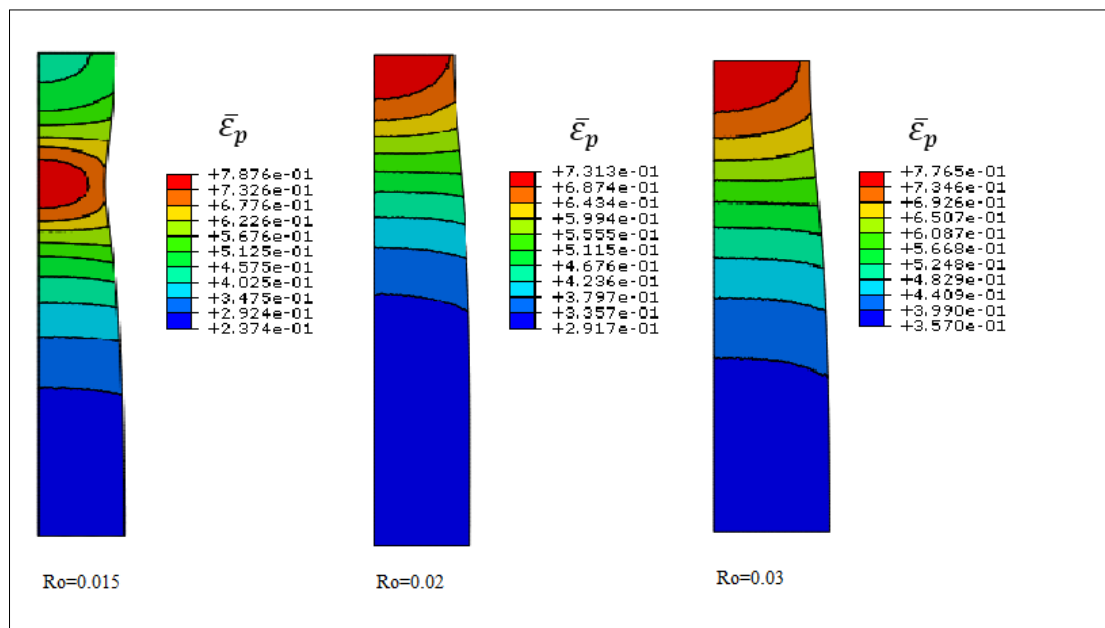


Figura 5.6 Distribución de deformación plástica equivalente en función de R_0 .

Para un estudio más detallado se analiza la evolución de la estricción a lo largo del análisis. Para ello se mide el desplazamiento radial, U_x , a lo largo del análisis. En las Figuras 5.7, 5.8 y 5.9 se presentan las gráficas de la evolución de estricción frente al tiempo para cada caso presentado en la Tabla 5.6.

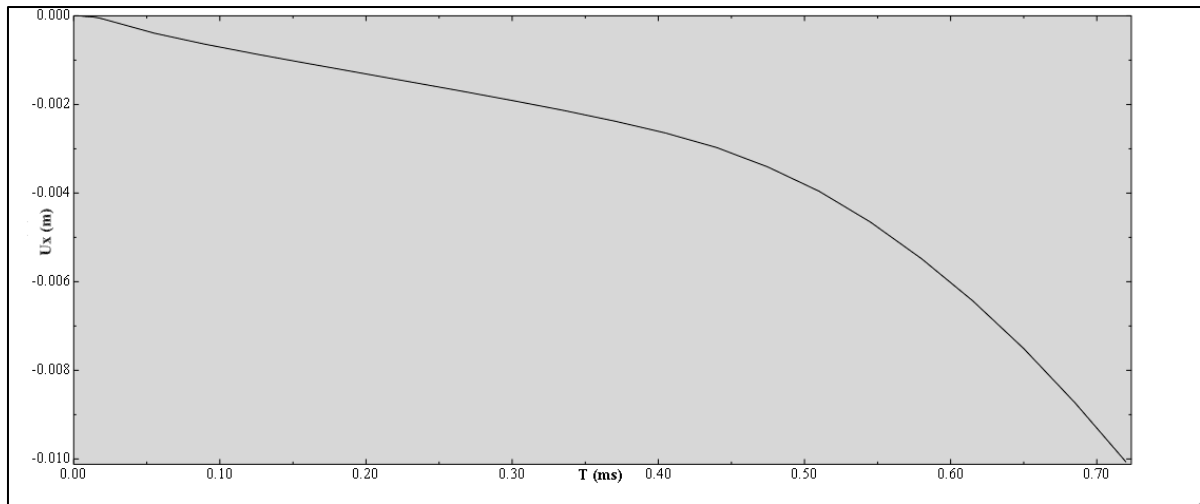


Figura 5.7 Gráfica Desplazamiento Radial vs Tiempo; $Ro=0.015$.

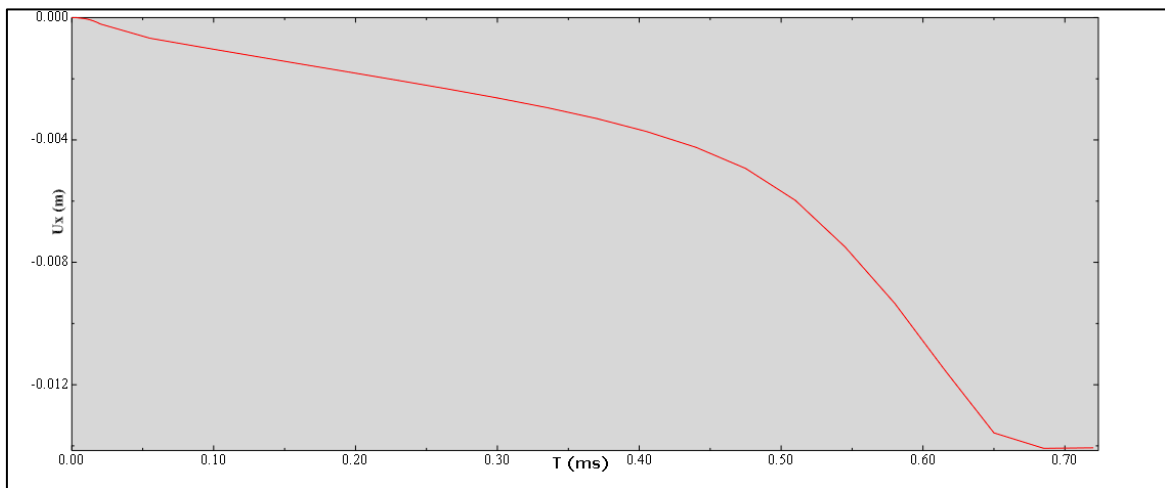


Figura 5.8 Gráfica Desplazamiento Radial vs Tiempo; $Ro=0.02$.

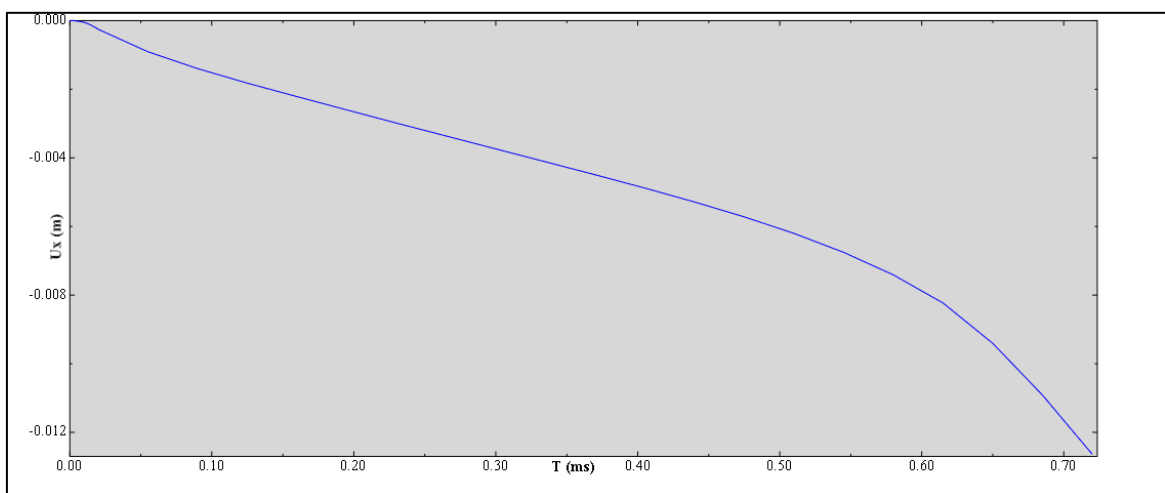


Figura 5.9 Gráfica Desplazamiento Radial vs Tiempo; $Ro=0.03$.

6. DISCUSIÓN

El objetivo de este apartado es discutir los resultados obtenidos durante la realización de los análisis. El porqué de estos resultados y cómo se relacionan con los ya existentes en la literatura se presenta en las siguientes líneas.

En primer lugar, se parte de los resultados obtenidos para una relación de longitudes variable. Como puede verse en la Figura 6.1, la dispersión de los resultados sigue una distribución particular.

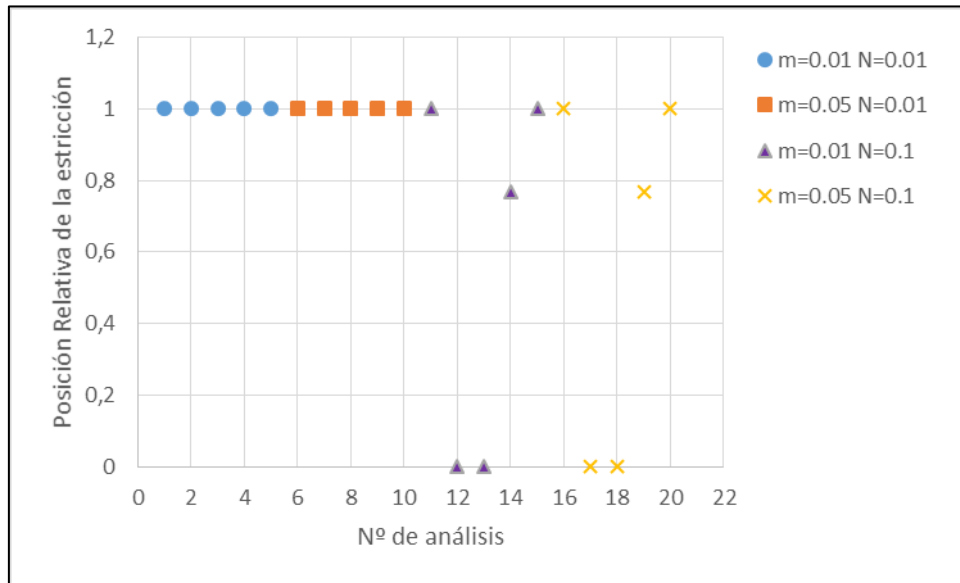


Figura 6.1 Gráfico de dispersión de resultados.

Los primeros diez análisis muestran la aparición de la estricción en el lado impactado. Esta localización se mantiene invariante a pesar de aumentar la relación de longitudes y/o el exponente de endurecimiento m .

Los resultados obtenidos en la literatura [3] muestran que una disminución de la relación de longitudes supone un acercamiento al comportamiento cuasiestático, mientras que un aumento incrementa el papel que tiene los efectos inerciales. En este caso los resultados no muestran ese acercamiento al comportamiento cuasiestático, al no haber ninguna estricción en la zona media para valores bajos de relación de longitudes. Esto puede deberse a una alta sensibilidad del modelo ante cargas dinámicas. El modelo estudiado no tiene ninguna imperfección geométrica o material, es decir, no existe ningún concentrador de tensiones que pueda ejercer como foco de la estricción. En este caso, el comportamiento cuasiestático se debe a condiciones de equilibrio y simetría, que tienen menos peso sobre el foco de la estricción que el que tendría un concentrador de tensiones. De esta manera, se especula que una alteración de la carga, como las aplicadas en este estudio, da lugar a una dominación por parte de los efectos inerciales frente a las condiciones de equilibrio y simetría, lo que evita el comportamiento cuasiestático. En el

caso de existir una entalla, la competición entre los lugares de estricción sería mayor, por lo que se posibilitaría alcanzar el comportamiento cuasiestático para menores valores de relación de longitudes (menores efectos inerciales).

En la Figura 5.1 se puede percibir la presencia de un segundo lugar de estricción que no llega a desarrollarse, probablemente porque no se alcanza el valor de relación de longitudes necesario para ello.

El efecto que tiene el exponente m sobre la localización de la estricción en este trabajo puede explicarse de manera similar al de las relaciones de longitudes. Las velocidades de deformación en una entalla tienen órdenes de magnitud muy superiores a las del resto del espécimen, esto produce un endurecimiento en los alrededores de esta, lo que produce una transferencia de la carga al resto del espécimen, alterando de esta manera el desarrollo de la estricción. En este caso, al no existir entalla, este fenómeno se ve menos acentuado.

A pesar de no notarse ningún efecto sobre la localización de la estricción, si se aprecia como la relación de longitudes produce una variación de la ductilidad estructural del modelo. Como puede verse en la Figura 5.2, un incremento de la relación de longitudes, que se traduce como un aumento de la velocidad de la carga, supone un aumento de la deformación hasta el desarrollo de la estricción debido a efectos inerciales. A partir del valor $L_0/L_c=0.08$ se produce una reducción de esta. Una explicación que justifique este suceso podría ser que se ha alcanzado la velocidad crítica de impacto (CIV), por lo que se reduce la ductilidad estructural. En este caso esto es poco probable, ya que no se aprecia un cambio drástico de la misma. Se especula que la ductilidad, al ser directamente proporcional a la velocidad de deformación e inversamente a la longitud, primero aumenta debido a una y luego disminuye debido a la otra, recordando que un incremento de la relación de longitudes supone un aumento de la longitud de la barra.

En esa misma gráfica se aprecia una disminución de la ductilidad al aumentar el valor de m , esto debería suceder al revés, al incrementar m debería aumentar la ductilidad debido al endurecimiento del material. Las ductilidades para ambos valores de m son similares, por lo que una explicación de esto podría ser la existencia de algún error durante la medición de la elongación. El criterio para medir esta elongación puede presentar pequeños errores al haberse realizado manualmente. El uso de un código que permitiese tomar una medida más exacta hubiese sido la opción ideal para subsanar esto.

Otra posible explicación para esto es una baja sensibilidad ante la velocidad de deformación debido a al método utilizado para introducir las características constitutivas. Para comprobar esto serían necesario realizar estudios mediante el uso de subrutinas.

Los análisis del 11 hasta el 20 muestran varias transiciones del lugar de estricción. Este empieza estando en la posición relativa 1, luego cambia a la posición relativa 0, donde se mantiene hasta volver a cambiar a la posición relativa 1. Cabe destacar que en los análisis

14 y 19 la estricción aparece en la posición relativa 0.77 aproximadamente, que corresponde a una posición intermedia entre la 0 y la 1. El fenómeno de propagación de ondas hace que sea posible la aparición del flujo plástico en cualquier posición de la barra para determinadas condiciones.

Aumentar el valor del exponente N supone una reducción del valor de relación de longitudes necesario para que se produzca la transición. Al aumentar este exponente se produce un endurecimiento en las zonas más deformadas, lo que produce una transferencia de la carga al resto de la barra, alterando de esta manera la localización de la estricción.

En la Figura 5.4 puede verse claramente un incremento de la ductilidad estructural con el aumento N . El endurecimiento del material produce una mayor resistencia a las deformaciones. Al igual que ocurre en la Figura 5.2, incrementar la relación de longitudes produce un aumento de la ductilidad estructural, y posteriormente, un decremento de esta.

Dada la naturaleza particular del análisis número 14, se toma este como referencia a la hora de analizar el efecto de k sobre la estricción.

Al contrario de lo que ocurre con relación de longitudes, cuya disminución supone una tendencia hacia el estado cuasiestático, con k , una disminución supone una tendencia al comportamiento dinámico y un aumento supone una tendencia hacia el cuasiestático [3]. Los resultados (Tabla 5.5 y Figura 5.5) muestran como disminuir (análisis 14.A) o incrementar k (análisis 14.B) altera la localización de la estricción. En ambos casos la localización se traslada a la posición relativa 1.

Como ocurre con los análisis 1-10, no se observa ninguna tendencia hacia el estado cuasiestático. Al igual que estos casos, se argumenta que este resultado se debe a una alta sensibilidad del modelo ante los efectos dinámicos.

Por otro lado, tomando otra vez como referencia el análisis 14, se realiza un estudio de los efectos de la esbeltez sobre la localización y el desarrollo de la estricción. Para ello se toman diferentes valores de R_0 sin variar el resto de parámetros. Los resultados muestran otra vez la sensibilidad del estado de transición mostrado en el análisis 14. Como ocurre con los análisis 14.A y 14.B, una alteración en las características del modelo provoca un cambio en la localización de la estricción. Los resultados de los análisis de esta parte del estudio (14.C y 14.D) muestran el lugar de estricción en la posición relativa 1 (Tabla 5.6 y Figura 5.6)

Es importante destacar el papel que juega el radio sobre la velocidad de desarrollo de la estricción. Comparando los análisis 14.C y 14.D, que tienen la misma localización de la estricción, se puede observar una disminución de la velocidad de desarrollo de la estricción. Esta velocidad se presenta como la pendiente en las gráficas de las Figuras 5.8 y 5.9. En estas gráficas se muestra el inicio de la estricción como un cambio en la

pendiente, que ocurre para ambos casos en torno a $T \approx 0.55 - 60 \text{ ms}$. Al aplicarse en ambos casos las mismas condiciones de contorno, la deformación estructural es la misma para ambos casos en ese tiempo. A partir de ese punto, en el análisis 14.D tiene menor pendiente, lo que indica una menor velocidad en el desarrollo de la estricción.

Nótese que en el análisis 14 se muestra una transición desde la posición relativa 0 hasta la posición relativa 1, por lo que tiene sentido que cualquier alteración que pueda retrasar el desarrollo de la estricción dé lugar a una localización en la posición relativa 1. Resulta intuitivo pensar que este es el caso al aumentar el radio. Como puede verse en las Figuras 5.7, 5.8 y 5.9, el aumento del radio produce un aumento no muy pronunciado del tiempo en el que aparece la estricción, lo que se muestra congruente con lo dicho en este mismo párrafo. Como ya se dijo anteriormente, el fenómeno que domina la localización de la estricción bajo condiciones dinámicas es el fenómeno de propagación e interacción de ondas. Una onda viaja a lo largo de la barra produciendo un gradiente de deformación plástica, cuando está alcanza un valor crítico se produce la estricción. En la Figura 5.6 se puede observar este fenómeno que retrata la verdadera naturaleza de este ensayo dinámico.

6.1. Líneas futuras de trabajo

En primer lugar, sería importante averiguar qué fenómeno está causando los resultados anómalos mostrados en la Figura 5.2, para ello lo ideal sería realizar medidas por medio de subrutinas para poder descartar el error humano.

Una posible línea de investigación sería centrarse en los efectos que tienen las condiciones de contorno sobre la localización de la estricción. En concreto, la aplicación de las cargas y la inicialización de las variables del problema. En este estudio las condiciones de contorno están simplificadas con respecto a la realidad, se toma un agarre ideal en la coordenada $Y = 0$, esto significa que no se considera ningún desplazamiento o velocidad en dicha componente. En la realidad siempre habrá algún desplazamiento o velocidad, por lo que el perfil de cargas aplicadas cambiaría.

Por otro lado, resultaría interesante introducir los efectos térmicos en el comportamiento del material haciendo uso de otras ecuaciones constitutivas, o introducir defectos que puedan actuar como concentradores de tensiones para aumentar la competición por el lugar de estricción, permitiendo de esta manera comprobar algunas de las especulaciones aquí planteadas.

En líneas generales, este estudio podría continuar mediante una aproximación más realista, es decir, con un modelo más cercano a las geometrías reales, introduciendo el comportamiento constitutivo mediante subrutinas o aplicando condiciones de contorno más realistas. Todo esto ayudaría a arrojar luz sobre el fenómeno dinámico.

7. CONCLUSIONES

Durante la realización de este trabajo se ha llegado a una serie de conclusiones esenciales para la comprensión del fenómeno que domina en la aparición de la estricción bajo condiciones dinámicas.

En primer lugar, se muestra el carácter determinista de la localización de la estricción. Esta localización puede ser predicha a partir de diferentes factores como la relación de longitudes, la relación de velocidades de deformación y factores que dominan sobre el endurecimiento del material, como los exponentes de endurecimiento. Si bien es cierto que existen ciertas incongruencias con la literatura, para las cuales se ha intentado dar la mejor explicación en la medida de lo posible, en líneas generales este trabajo se mantiene coherente con otros estudios similares.

Por otro lado, se ha podido mostrar el efecto que tiene la esbeltez sobre el desarrollo de la estricción. Una disminución de esta produce una reducción en la velocidad de desarrollo de la estricción. En este sentido, este trabajo ha coincidido con los resultados preexistentes en la literatura.

De manera secundaria se han podido observar otros conceptos fundamentales como el fenómeno de propagación de ondas o la variación de la ductilidad estructural en función de la velocidad de la carga y la longitud del espécimen.

Es importante destacar que todos estos resultados, que son coherentes con otros estudios, se han obtenido a partir de un método simplificado de análisis.

Ante todos estos resultados, es posible considerar el desempeño de este estudio como exitoso, al haberse cumplido la mayoría de los objetivos propuestos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Fakhry, «FEA Software Unlocks Door To Low-Cost License Flexibility,» www.electronicdesign.com, Marzo 2003. [En línea]. Available: <https://www.electronicdesign.com/test-amp-measurement/fea-software-unlocks-door-low-cost-license-flexibility>. [Último acceso: 10 Septiembre 2019].
- [2] «Hourglassing, » <http://www.cae-wiki.info>, 17 Diciembre 2015. [En línea]. Available: <http://www.cae-wiki.info/wikiplus/index.php/Hourglassing>. [Último acceso: 10 Septiembre 2019].
- [3] A. Needleman, «Effect of size on necking of dynamically loaded notched bars,» *Mechanics of Materials*, n° 000, pp. 1-9, Agosto. 2016.
- [4] S. Osovski , D. Rittel , J. A. Rodríguez-Martínez y R. Zaera, «Dynamic tensile necking: influence of specimen geometry and boundary conditions,» *Mechanic of Materials*, n° 62, pp. 1-13, Marzo. 2013.
- [5] «Probetas,» <https://lsaratxaga.wordpress.com>, [En línea]. Available: <https://lsaratxaga.wordpress.com/ensayo-de-traccion/probetas/>. [Último acceso: 10 Septiembre 2019].
- [6] D. Rittel, Y. Rotbaum, J. A. Rodríguez-Martínez, D. Sory y R. Zaera, «Dynamic necking of notched tensile bar: an experimental study,» *Experimental Mechanics*, n° 54, pp. 99-109, Marzo. 2014.
- [7] Y. Rotbaum, S. Osovski y D. Rittel, «Why does necking ignore notches in dynamic tension?,» *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, n° 78, pp. 173-185, Febrero. 2015.
- [8] A. Vaz-Romero, D. Rittel, J. A. Rodríguez-Martínez y Y. Rotbaum, «Necking evolution in dynamically stretched bars: New experimental and computational insights,» *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, n° 91, pp. 216-239, Febrero. 2016.
- [9] A. Vaz-Romero, A. Arias y J. A. Rodríguez-Martínez, «The deterministic nature of the fracture location in the dynamic tensile testing of steel sheets,» *International Journal of Impact Engineering*, n° 86, pp. 318-335, Agosto. 2015.

- [10] A. Vaz-Romero y J. A. Rodríguez-Martínez, «On the interplay between material flaws and dynamic necking,» *Mechanics Research Communications*, nº 72, pp. 53-58, Enero. 2016.

ANEXO: ESTUDIO ECONÓMICO

El objetivo de este anexo es calcular el coste hipotético que supondría realizar el estudio presentado. Para ello se tienen en cuenta los costes de mano de obra, costes de licencia del *software* utilizado y otros costes de consumibles.

En primer lugar, se realiza la cuenta de los costes por mano de obra. Para ello es necesario estimar las horas trabajadas y la cantidad de trabajadores que se han dedicado al proyecto. Para este caso se estiman en 200 horas el tiempo dedicado exclusivamente a la realización del trabajo. En este tiempo se incluyen la investigación previa, el desarrollo del problema con la obtención de resultados y la redacción de la memoria. La mano de obra empleada es la correspondiente a un ingeniero junior con un sueldo estimado de 1800€ mensuales. Tomando como referencia un contrato de jornada completa (40 horas semanales) el precio por hora de la mano de obra quedaría en 11€/h.

Tabla A. 1 COSTE DE LA MANO DE OBRA

N.º de horas trabajadas	Coste horario (€/h)	Total (€)
160	11	1760

Por otro lado, se tienen en cuenta los costes derivados de las licencias utilizadas y los artículos consultados para la investigación. El coste de la licencia de *Abaqus* se toma como 20.000€ anuales, en los que se incluye manteniendo y otros servicios [1].

La licencia de otros programas (*Word* y *Excel*) no se tiene en cuenta al existir otras opciones de uso gratuito y desempeño similar.

Se han consultado diversos artículos para familiarizarse con el fenómeno a estudiar. El precio estimado de cada uno de estos artículos es de 30€.

Tabla A. 2 COSTE DE RECURSOS EN EUROS (€)

Coste de investigación	Coste licencia Abaqus	Coste de equipo	Total
150	20000	850	21,000

Por último, se consideran los costes de consumo relacionados con el equipo. Estos recursos son la potencia eléctrica consumida por el equipo e internet para tener acceso

remoto al servidor de *Abaqus*. Los costes de este servidor ya están incluidos en la licencia del programa.

Tabla A. 3 COSTE DE CONSUMIBLES

Coste de la luz (€/KWh)	Consumo del equipo (W)	N.º de horas	Coste de internet (€)	Total (€)
0.15	220	160	34	39.28

Tabla A. 4 COSTE TOTAL

Coste de mano de obra	Coste de recursos	Coste de consumibles	Total (€)
1760	21000	39.28	22,799.28

Cabe destacar que este presupuesto se rebajaría notablemente si se tuviese en cuenta que no toda la inversión de la licencia de *software* se aplicase sobre un único proyecto. Del mismo modo, la inversión en el equipo tampoco recaería por completo sobre este.